

## УДЕЛЬНАЯ РАБОТА РЕЗАНИЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ДУБА И БЕРЕЗЫ

Процессу фрезерования древесины посвящен ряд экспериментальных работ. В частности, в журнале «Деревообрабатывающая промышленность» № 12 за 1956 г. опубликована работа М. М. Козела по фрезерованию сосны. Однако фрезерованию древесины лиственных пород, находящихся широкое применение в целом ряде столярно-механических производств, посвящено очень мало исследовательских работ, а потому влияние отдельных факторов на процесс фрезерования этих пород остается до сих пор недостаточно изученным. Кроме того, в большинстве проведенных экспериментальных работ по фрезерованию лиственных пород или вообще не выведено никаких количественных зависимостей в виде уравнений связи, которые могли бы быть в какой-либо мере использованы на практике при расчете станков, инструментов и режимов обработки, или выведены только ограниченные эмпирические зависимости для частных случаев фрезерования, вследствие чего последние тоже практически не могут быть использованы для расчетов. В нашей литературе<sup>1</sup> неоднократно указывается, что «Математическое обобщение экспериментальных материалов, концентрируя в формуле разнородные влияния, позволяет шире взглянуть на изучаемые явления и получить выводы, ценные в практическом и теоретическом отношении».

Доцент С. А. Воскресенский в одной из своих работ<sup>2</sup> пишет: «Чувствуется острая потребность в формуле, аналитически связывающей основные факторы режима строгания с расходуемой на резание древесины мощностью и усилием подачи».

<sup>1</sup> А. Л. Бершадский. «Резание древесины». Гослесбумиздат, 1956 г., стр. 107.

<sup>2</sup> С. А. Воскресенский. Метод расчета мощности строгания древесины и усилия подачи. ЦНИИМОД. ВНИТОЛес, 1939. На правах рукописи, стр. 1.

Необходимость формул, в которых были бы взаимно связаны основные факторы режима фрезерования листовых пород с силовыми и энергетическими параметрами, очевидна и бесспорна.

В предложенной проф. А. Л. Бершадским [1] формуле  $K = \frac{a_v \cdot a_p \cdot a_w K^* \psi^{\delta}}{e^m}$  для удельной работы при открытом резании влияние некоторых факторов, в частности, скорости резания, учитывается отдельным сомножителем без взаимосвязи с остальными факторами. Поэтому эта формула также требует уточнения и дополнения путем дальнейшего экспериментального изучения процесса фрезерования древесины разных пород.

В Белорусском лесотехническом институте им. С. М. Кирова автором данной статьи проводилась экспериментальная работа по исследованию закономерностей влияния направления волокон древесины, угла резания, толщины стружки и скорости резания на удельную работу и мощность при фрезеровании древесины дуба и березы. Опыты проводились на одношпиндельном вертикально-фрезерном станке типа Ф-4. Скорость резания изменялась в пределах от 28 до 70 м/сек. Для механической подачи материала станок был оборудован специальным тяговым механизмом, позволявшим получить скорость подачи от 1,3 до 28,9 м/мин и толщины стружек от 0,025 до 0,55 мм. Ширина фрезерования для всех случаев была постоянной, равной 20 мм. Толщина снимаемого слоя 3 мм.

Мощность, подведенная к механизму резания, фиксировалась при помощи саморегистрирующего киловатт-метра и контрольного комплекта электроизмерительных приборов. Движение диаграммной ленты саморегистрирующего киловатт-метра было связано с ходом образца. Установка тарировалась методом торможения. Число оборотов шпинделя контролировалось при помощи электротехнометра. В качестве инструмента применялись прямолинейные ножи. Фрезерование проводилось при трех углах резания: 51,5°, 62,5° и 73,5°. Образцы для опытов вырезались под различными углами к направлению волокон древесины из сухих дубовых и березовых досок толщиной 30 мм. Средние показатели физико-механических свойств опытной древесины дуба и березы следующие:

Порода	Влажность в %	Объемный вес в г/см <sup>3</sup>	Временное сопротивление сжатию вдоль волокон в кг/см <sup>2</sup>
Береза . . . .	10,8	0,663	493
Дуб . . . . .	11,25	0,714	512

Отклонения отдельных свойств от средних значений допускались  $\pm 3\%$ . С целью получения определенной длительности процесса для более точного фиксирования фактической величины подведенной мощности опыты проводились над составными образцами длиной 2,7 м. Последние крепились в специальных цулагах.

Полученные нами опытные данные обрабатывались методом вариационной статистики. В данной статье приводим для иллюстрации некоторые характерные опытные графики и полученные нами зависимости влияния направления волокон, скорости резания, толщины стружки и угла резания на удельную работу и мощность резания при продольно-торцовом фрезеровании дуба и березы. В результате обработки опытных данных нами установлено, что с увеличением толщины стружки во всех случаях удельная работа падает (см. рис. 1), что соответствует всем ранее проведенным исследованиям. Зависимость удельной работы ряда других авторов с достаточной для практики степенью точности может быть выражена уравнением вида:

$$K = \frac{K'}{e^m}, \quad (1)$$

где:  $K$  — удельная работа резания в  $кгм/см^3$ ;  $K'$  — удельная работа резания при толщине стружки, равной 1 мм;  $e$  — средняя толщина стружки в мм;  $m$  — показатель степени, характеризующий интенсивность изменения удельной работы от толщины стружки.

По данным проф. А. Л. Бершадского (1), степенной показатель  $m$  зависит только от направления волокон древесины при

резании и не зависит от вида обработки, породы, скорости резания и других переменных факторов. При резании вдоль волокон, по его данным,  $m = 0,55$ , а при резании вторец  $m = 0,33$ .

Анализируя значения показателя степени  $m$ , полученные нами в результате обработки опытных данных при разных углах резания, углах встречи и скоростях резания, мы установили, что эти значения различны для дуба и березы при прочих одинаковых параметрах. В пределах каждой породы значения показателя сте-

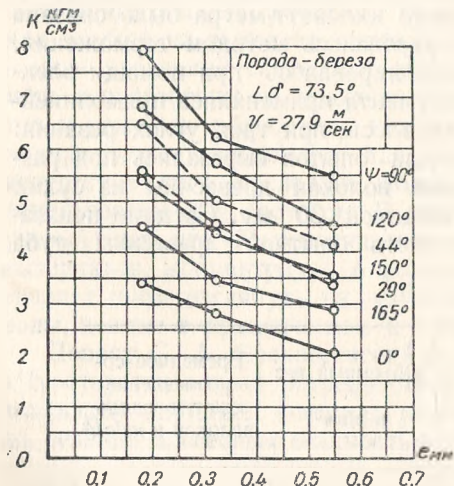


Рис. 1. Зависимость уд. работы резания  $K$  от ср. толщины стружки  $e$  и угла встречи  $\psi$ .

пени изменяются с изменением скорости резания и очень незначительно изменяются с изменением угла резания. При этом не обнаруживается какой-либо определенной закономерности влияния угла резания на показатель степени  $m$ . Полученные отклонения для разных углов резания находятся в пределах как точности самих опытов, так и точности обработки опытных данных. Из графиков  $m = f(\psi)$  (см. рис. 2) видно, что с изменением угла встречи от  $180^\circ$  до  $90^\circ$  (фрезерование по направлению волокон) и от  $0$  до  $90^\circ$  (фрезерование против направления волокон) показатель степени  $m$  уменьшается. С увеличением скорости резания во всех случаях значения величины  $m$  также уменьшаются. Закон изменения  $m$  от угла встречи  $\psi$  и скорости резания  $v$  точнее всего может быть выражен следующими уравнениями:

для дуба  $m = 0,536 - 0,105 \sin \psi - 0,0013 v$  для фрезерования по направлению волокон, (2)

$m = 0,536 - 0,105 \sin^{3,5} \psi - 0,0013 v$  для фрезерования против направления волокон; (3)

для березы  $m = 0,484 - 0,112 \sin^{0,9} \psi - 0,001 v$  для фрезерования по направлению волокон, (4)

$m = 0,484 - 0,112 \sin^{2,7} \psi - 0,001 v$  для фрезерования против направления волокон. (5)

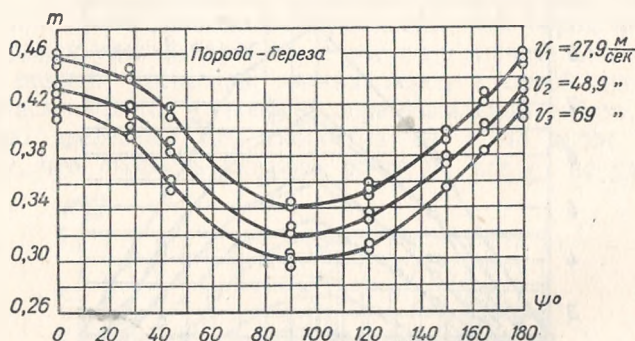


Рис. 2. Зависимость степенного показателя  $m$  от угла встречи  $\psi$ .

Рассматривая графики зависимости удельной работы резания  $K$  от угла встречи (см. рис. 3), мы видим, что с изменением угла встречи от  $180$  до  $90^\circ$  и от  $0$  до  $90^\circ$  удельная работа растет, что соответствует данным других исследователей. Характер кри-

вых зависимости  $K = f(\psi)$  несколько различен при фрезеровании по направлению волокон и фрезеровании против направления волокон. Объясняется это различным характером процесса резания и образования стружки, а также и тем, что при фрезеровании против направления волокон в большинстве исследуемых здесь случаев имели место те или иные выколы и вырывы древесины, что не могло не отразиться на полученных средних значениях удельной работы резания. Кривые зависимости  $K = f(\psi)$  имеют синусоидальный характер. В результате математической обработки опытных данных мы нашли, что эта зависимость аналогично исследованиям других авторов с достаточной точностью может быть выражена уравнением

$$K' = K'_{\parallel} + (K'_{\perp} - K'_{\parallel}) \sin^a \psi, \quad (6)$$

где:  $K'_{\parallel}$  — удельная работа при фрезеровании вдоль волокон;  $K'_{\perp}$  — удельная работа при фрезеровании впоперек;  $\psi$  — угол встречи между направлением волокон древесины и вектором скорости резания;  $a$  — показатель степени.

По данным профессора А. Л. Бершадского [1], при продольно-торцовом резании  $a = 1,25$ , т. е. является величиной постоянной, не зависящей ни от породы, ни от скорости резания и других переменных факторов.

Анализируя полученные нами значения степенного показателя  $a$  для разных режимов фрезерования, мы установили, что  $a$  изменяется с изменением скорости резания и его значения различны

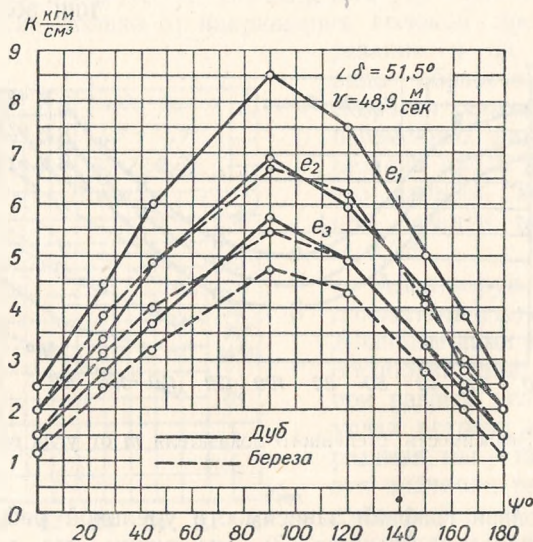


Рис. 3. Зависимость уд. работы резания  $K$  от угла встречи  $\psi$  при разных толщинах стружки  $e$  ср.

для дуба и березы. Изменение же угла резания в пределах одной породы очень незначительно отражается на показатель степени  $a$ . Зависимость  $a$  от скорости резания при фрезеровании дуба и березы может быть выражена следующими уравнениями:

для дуба  $a = 0,005 v + 0,97$  для фрезерования по направлению волокон, (7)

$a = 0,007 v + 1,45$  для фрезерования против направления волокон; (8)

для березы  $a = 1,388 - 0,004 v$  для фрезерования по направлению волокон, (9)

$a = 0,008 v + 1,17$  для фрезерования против направления волокон.

На основе полученных зависимостей для степенного показателя  $a$  и уравнений связи  $K' = K'_{\parallel} + (K'_{\perp} - K'_{\parallel}) \sin^a \psi$  нами построены графики  $K' = f(\psi)$  для всех скоростей и углов резания, принятых нами для исследования. Один из таких графиков приведен на рис. 4.

По вопросу влияния скорости резания на удельную работу резания, имеются различные противоречивые мнения. Так, например, доктор технических наук Ф. М. Манжос [2] при строгании древесины на фуговальном станке при двух скоростях резания (20,6 и 27 м/сек) обнаружил некоторое падение удельной мощности на резание с увеличением  $v$ . А. К. Петруша [7] в своей работе по элементарному резанию древесины на лабораторной установке при скоростях резания 4,5 ÷ 50 м/сек установил интенсивное падение удельной работы с ростом скорости до 30 м/сек и значительно меньшую интенсивность с ростом скорости резания от 30 до 50 м/сек. Им же установлено, что при резании сухой древесины твердолиственных пород интенсивность падения удельной работы с ростом  $v$  значительно меньше, чем при резании древесины мягких пород и сырой древесины. Ф. Н. Масленков [5] в своей экспериментальной работе по фрезерованию древесины при скоростях 34 и 43 м/сек пришел к выводу, что скорость резания почти не влияет на удельную

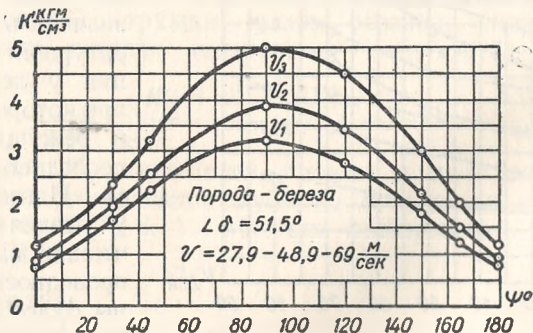


Рис. 4. Зависимость  $K_{e=1}$  от угла встречи  $\psi$  и скорости резания  $v$ .

работу резания. М. М. Козел [6] в своей диссертационной работе по фрезерованию сосны при скоростях 38 — 89 м/сек выявил некоторое падение удельной работы резания при увеличении скорости от 38 до 45 м/сек при тонких стружках. При толстых же стружках в этом диапазоне скоростей изменение последних почти не влияет на удельную работу. При увеличении же скорости резания от 45 до 89 м/сек во всех случаях с ростом  $v$  растет и удельная работа. При фрезеровании сосны поперек волокон М. М. Козел [6] нашел, что во всех случаях увеличение скорости резания ведет к увеличению удельной работы резания. В исследованиях по резанию металлов фактор скорости резания увязывается с температурным фактором. Изменение же температуры реза и обрабатываемого материала во взаимодействии с другими факторами может приводить к различным зависимостям между скоростью резания и удельной работой. Безусловно, что и при резании древесины на зависимость  $K = f(v)$  влияет взаимодействие многих факторов в различном их сочетании.

Исследование вопроса влияния малых скоростей резания при фрезеровании представляет теоретический интерес. Нами же исследовались скорости резания в диапазоне 28—70 м/сек, имеющие практическое значение для производства. На основании полученных нами опытных данных установлено, что с увеличением скорости резания во всех случаях удельная работа растет. Характер изменения удельной работы в зависимости от скорости резания виден из графика, представленного на рис. 5. Рост удельной работы с увеличением скорости резания в наших условиях, видимо, имел место за счет перевеса таких явлений, как увеличение временного сопротивления древесины разрушению при повышении скорости деформации, увеличение работы на

преодоление сил инерции сравнительно более толстых стружек, чем у других исследователей, а также за счет возможно значительной температурной концентрации у лезвия реза, при которой твердость и режущие свойства последнего снижаются. Нагрев же реза у лезвия из-за ничтожно малой теплопроводности древесины будет тем больше, чем больше скорость резания и подачи.

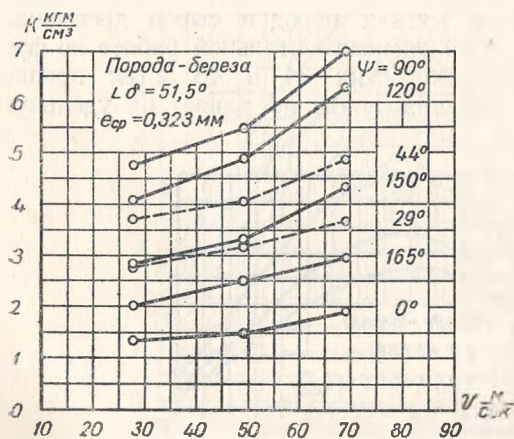


Рис. 5. Зависимость уд. работы резания  $K$  от скорости резания  $v$  и угла встречи  $\psi$ .

По вопросу влияния угла резания на удельную работу резания особых разногласий нет, так как работами многих исследователей установлено, что с увеличением угла резания растет и удельная работа вследствие изменения характера деформации стружки, увеличения ее усадки и силы воздействия на заднюю грань резца. Однако количественных связей между удельной работой и углом резания при различных режимах фрезерования достаточно не выявлено.

Из графика зависимости силы резания от угла резания доц. С. А. Воскресенского [4], составленного им на основании своих исследований и экспериментальных работ Брюне и А. Е. Золотарева по резанию дуба при скорости резания  $0,01 \text{ м/сек}$  и углах резания  $50-70^\circ$ , видно, что зависимость  $P = f(\delta)$  имеет прямолинейный характер. Из графика зависимости  $K = f(\delta)$  профессора Ф. М. Манжоса [3] по фрезерованию дуба и сосны при скорости резания  $50 \text{ м/сек}$ , средней толщине стружки  $0,14 \text{ мм}$  и углах резания  $55-87^\circ$  видно, что, хотя эта зависимость имеет криволинейный характер, однако в пределах практически применяемых углов резания  $55-70^\circ$  зависимость эта тоже почти прямолинейна. Анализируя наши данные, мы нашли, что и в наших опытах зависимость  $K = f(\delta)$  при различных других параметрах практически тоже близка к прямолинейной.

Закон изменения удельной работы резания вдоль волокон ( $\psi = 0^\circ$ ) и вторец ( $\psi = 90^\circ$ ) при средней толщине стружки, равной  $1 \text{ мм}$  в зависимости от скорости резания и угла резания, может быть выражена следующими уравнениями:

$$\text{для дуба } K'_{\parallel} = 0,007 v + 0,029 \delta - 0,732, \quad (11)$$

$$K'_{\perp} = 0,042 v + 0,064 \delta - 0,79; \quad (12)$$

$$\text{для березы } K'_{\parallel} = 0,009 v + 0,036 \delta - 1,359, \quad (13)$$

$$K'_{\perp} = 0,044 v + 0,051 \delta - 0,762, \quad (14)$$

где:  $v$  — скорость резания в  $\text{м/сек}$ ;  $\delta$  — угол резания в градусах.

Таким образом, общая зависимость между удельной работой резания, толщиной стружки, углом резания, скоростью резания и углом встречи выражается следующей формулой:

$$K = \frac{K'_{\parallel} + (K'_{\perp} - K'_{\parallel}) \sin^a \psi}{e^m} \quad (15)$$

Значения  $K'_{\parallel}, K'_{\perp}$  показателей степени  $a$  и  $m$  могут быть определены для фрезерования дуба по полученным нами уравнениям связи 2, 3, 7, 8, 11, 12; для фрезерования березы по 4, 5, 9, 10, 13, 14.

Мощность резания:

$$N_p = \frac{K \cdot b \cdot H \cdot U}{60 \cdot 102} = \frac{[K'_{\parallel} + (K'_{\perp} - K'_{\parallel}) \sin^a \psi] \cdot b \cdot H \cdot U}{60 \cdot 102 \cdot e^m} \quad (16)$$



## Касательная сила резания

$$P_p = \frac{[K'_{\parallel} + (K'_{\perp} - K'_{\parallel}) \sin^{\alpha} \psi] \cdot b \cdot H \cdot U}{60 \cdot v \cdot e^m}, \quad (17)$$

где:  $N_p$  — мощность резания в *квт*;  $P_p$  — касательная сила резания в *кг*;  $b$  — ширина фрезерования в *мм*;  $U$  — скорость подачи в *м/мин*.

При сравнении наших опытных значений удельной работы резания со значениями, вычисленными по полученным нами уравнениям связи, расхождения не выходят за пределы от  $-7,9\%$  до  $+10,7\%$  — для березы и от  $-7,54\%$  до  $+9,7\%$  — для дуба (для разных случаев фрезерования).

Сопоставление опытных данных Ф. Н. Масленкова [5] по строганию дуба при скоростях резания 34 и 43 *м/сек*, толщине снимаемого слоя 3 *мм*, угле резания  $55^\circ$  и разных толщинах стружки со значениями удельной работы при тех же параметрах, вычисленными по нашим формулам, показало, что расхождения лежат в пределах от  $-1,5\%$  до  $+9\%$ . Учитывая неоднородность физико-механических свойств древесины и различие условий проведения опытов, следует считать эти расхождения незначительными.

При сравнении опытных кривых А. К. Петруша [7] по резанию березы с данными, вычисленными по нашим формулам для тех же параметров при двух скоростях резания (36 и 44 *м/сек*), получены расхождения в пределах от  $+4\%$  до  $-13\%$ . Эти расхождения вполне объяснимы различными условиями опытов.

Вопросу исследования качества обработки при фрезеровании древесины специально посвящена диссертационная работа Н. А. Кряжева [8].

В нашей работе качество обрабатываемой поверхности определялось визуально с помощью лупы и путем непосредственного сравнения поверхностей обработки при различных режимах фрезерования. На основании этих наблюдений установлено следующее:

а) при фрезеровании дуба и березы вдоль волокон и углах встречи  $\psi = 180-90^\circ$  изменение угла резания от 51 до  $73^\circ$  на качество поверхности не сказывалось. При фрезеровании же против волокон ( $\psi = 0-90^\circ$ ) качество поверхности несколько ухудшалось с уменьшением угла резания;

б) изменение скорости резания от 28 до 49 *м/сек* заметного влияния на чистоту поверхности не оказывало. При скорости резания 69 *м/сек* отмечено некоторое улучшение качества обработки при углах встречи от 180 до  $90^\circ$  и значительное улучшение чистоты обработки при углах встречи от 0 до  $90^\circ$ ;

в) при фрезеровании древесины по волокнам увеличение толщины стружки от 0,025 до 0,55 *мм* приводило к незначительному ухудшению качества обработки только при максимальной толщине стружки 0,55 *мм*. При фрезеровании же против волокон увеличение толщины стружки приводило к резкому ухудшению

чистоты обработки при всех углах и скоростях резания и только при толщине стружки  $0,025$  мм и скорости резания  $69$  м/сек на обрабатываемой поверхности не наблюдалось никаких вырывов и заколов древесины.

## ВЫВОДЫ

1. С увеличением толщины стружки во всех случаях удельная работа уменьшается. Закономерность изменения  $K$  от  $e$  зависит от породы древесины, угла встречи и скорости резания.

2. Закон изменения удельной работы резания от угла встречи также зависит от породы, скорости резания и направления фрезерования (по волокнам или против волокон). Во всех случаях с изменением угла встречи от  $180$  до  $90^\circ$  и от  $0$  до  $90^\circ$  удельная работа растет.

3. Увеличение угла резания от  $51$  до  $73^\circ$  приводит к увеличению удельной работы резания во всех случаях.

4. С увеличением скорости резания от  $28$  до  $69$  м/сек удельная работа резания растет. Интенсивность изменения  $K$  от  $v$  зависит от породы, угла встречи и угла резания.

5. При фрезеровании древесины дуба и березы по направлению волокон скорость резания свыше  $40$ — $50$  м/сек не приводит к заметному улучшению качества при всех прочих равных условиях. При фрезеровании же против направления волокон увеличение скорости резания до  $70$  м/сек приводит к значительному улучшению чистоты обрабатываемой поверхности.

6. Изменение толщины стружки в пределах  $0,025$ — $0,55$  мм при фрезеровании по направлению волокон и скоростях резания  $28$ — $69$  м/сек незначительно сказывается на качестве обработки. При строгании же дуба и березы против направления волокон увеличение толщины стружки резко ухудшает качество обрабатываемой поверхности. Максимальная толщина стружки, при которой не замечались на обрабатываемой поверхности вырывы и заклы древесины, равна  $0,025$  мм при скорости резания  $69$  м/сек. Таким образом, выбор скорости резания при установлении режимов фрезерования древесины дуба и березы по направлению волокон диктуется при практикуемых толщинах стружки не качеством обработки, а желаемой производительностью. При фрезеровании же против волокон увеличение скорости резания диктуется качеством обработки.

7. Изменения угла резания от  $51$  до  $73^\circ$  при фрезеровании по направлению волокон почти не сказывается на качестве. При фрезеровании против направления волокон уменьшение угла резания от  $73$  до  $51^\circ$  приводит к заметному ухудшению качества.

8. Установленные математические зависимости дают возможность определить значение удельной работы и мощности резания при фрезеровании дуба и березы при скоростях резания от

25 до 70 м/сек, углах резания 45—75° и углах встречи от 0,180 до 90° при различных толщинах стружки.

9. В упомянутых формулах влияние перечисленных факторов установлено не в виде отдельных независимых слагаемых или сомножителей, а в их взаимосвязи и взаимовлиянии.

10. Ориентировочные значения удельной работы резания при исследуемых в данной работе скоростях резания, углах встречи и углах резания могут быть определены путем нахождения значений  $K'$  и показателя степени  $m$  из соответствующих графиков  $K' = f(v_1, \psi)$  для разных углов резания и графиков зависимости  $m = f(v_1, \psi)$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Л. Бершадский. Резание древесины. Гослесбумиздат, 1956 г.
2. Ф. М. Манжос. Исследование процесса строгания дерева вращающимися резцами. ЦНИИМОД. Станки и инструменты. Гослестехиздат, 1934 г.
3. Ф. М. Манжос. Фрезерные станки и их эксплуатация. Гослестехиздат, 1940 г.
4. С. А. Воскресенский. Резание древесины. Гослесбумиздат, 1955 г.
5. Ф. Н. Масленков. Удельное давление резания и расчет мощности при плоском строгании древесины. Диссертация, 1939 г.
6. М. М. Козел. Сила резания в зависимости от скорости резания и динамических углов встречи при фрезеровании древесины сосны. Диссертация, 1955 г.
- †7. А. К. Петруша. Влияние скорости резания на процесс резания древесины. Диссертация ЛТА, 1953 г.
8. Н. А. Кряжев. Исследование качества обработки древесины при цилиндрическом фрезеровании. Автореферат МЛТИ, 1954 г.